

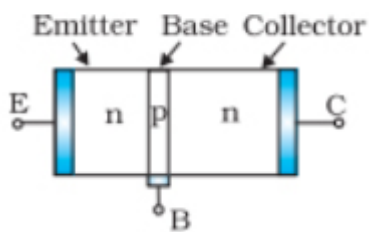
Chapitre 3. Transistor bipolaire

Introduction à un transistor de jonction

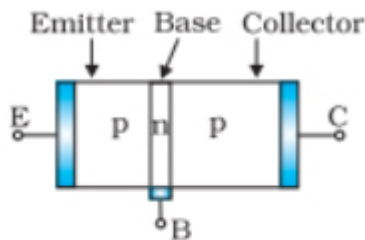
Un transistor à jonction a trois régions dopées - émetteur, base et collecteur.

Ces régions forment entre elles deux jonctions PN. Selon le nombre de semi-conducteurs de type N et P dans le transistor, ils sont de deux types:

n-p-n transistor

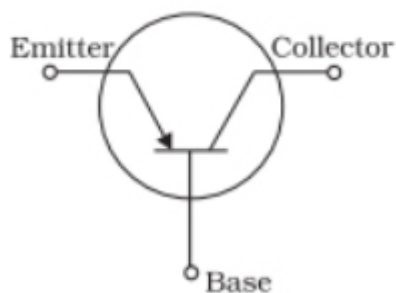


Transistor NPN: un semi-conducteur de type p (base) sépare deux segments du semi-conducteur de type n (émetteur et collecteur).

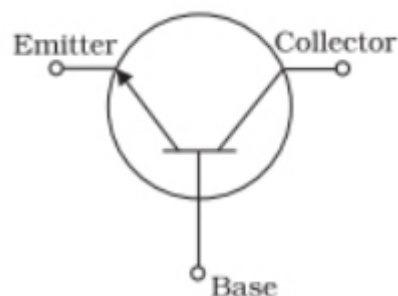


p-n-p transistor

Transistor PNP: un semi-conducteur de type n (base) sépare deux segments du semi-conducteur de type p (émetteur et collecteur). Comme on peut le voir sur les deux figures ci-dessus, les trois segments ont des épaisseurs et des niveaux de dopage différents. Les symboles schématiques de ces deux transistors sont les suivants:



p-n-p transistor



n-p-n transistor

La pointe de flèche indique la direction du courant conventionnel dans le transistor.
Comprenons les trois segments en détail:

Émetteur	Ce segment est sur un côté du transistor. Il a une taille modérée et est fortement dopé, ce qui lui permet d'alimenter un grand nombre de supports pour la circulation du courant.
Base	Ce segment est au centre du transistor. Il est fin et légèrement dopé.
Collecteur	Ce segment est sur l'autre côté du transistor. Il est plus grand que l'émetteur et est modérément dopé. Par conséquent, il recueille la plupart des supports majoritaires fournis par l'émetteur.

De même, dans le cas d'un transistor à jonction, les régions d'appauvrissement sont formées au niveau de la jonction émetteur-base et de la jonction base-collecteur. Pour comprendre l'action du transistor, il est important de considérer la nature des régions d'appauvrissement formées à ces jonctions.

Il est également important de noter ici que le transistor de jonction a été inventé pour produire une copie agrandie d'un signal - un amplificateur. Finalement, il est devenu tout aussi populaire comme interrupteur.

Classification des métaux, conducteurs et semi-conducteurs

Les solides peuvent être classés comme métaux, semi-conducteurs ou isolants en fonction de la conductivité ou de la résistivité et des bandes d'énergie dans l'électronique. Cela nous aide à comprendre la théorie des bandes et l'importance des bandes de valence et de conduction dans les solides. Étudions également les types de semi-conducteurs.

Classification basée sur la conductivité

Les valeurs relatives de la conductivité électrique (σ) et de la résistivité ($\rho = 1 / \sigma$) aident à classer les solides comme:

- **Métaux** - Ce sont des solides qui ont une résistivité très faible ou une conductivité très élevée). Par conséquent,

$$\sigma \sim 10^2 - 10^8 \text{ S / m}$$

$$\rho \sim 10^{-2} - 10^{-8} \Omega\text{m}$$

- **Isolants** - Ce sont des solides qui ont une résistivité très élevée ou une conductivité très faible. Par conséquent,
 $\sigma \sim 10^{-11} - 10^{-19} \text{ S / m}$
 $\rho \sim 10^{11} - 10^{19} \Omega\text{m}$
- **Semi - conducteurs** - Ce sont des solides qui ont des valeurs de résistivité ou de conductivité entre celles des métaux et des isolants. Par conséquent,
 $\sigma \sim 10^5 - 10^{-6} \text{ S / m}$
 $\rho \sim 10^{-5} - 10^6 \Omega\text{m}$

Il est important de noter que ces valeurs sont indicatives et pourraient également sortir de la plage . Concentrons-nous sur les semi-conducteurs. Ceux-ci peuvent être des types suivants:

Types de semi-conducteur

Les semi-conducteurs élémentaires - disponibles naturellement comme le silicium (Si) et le germanium (Ge)

Les semi-conducteurs composés - fabriqués en mélangeant deux métaux ou plus ensemble. Ils sont subdivisés en ces catégories:

- Inorganique; comme CdS, GaAs, CdSe, etc.
- Organique ; comme l'anthracène, la phtalocyanine dopée, etc.
- Polymères organiques; comme le polypyrrole, la polyaniline, le polythiophène, etc.

La plupart des dispositifs à semi-conducteurs disponibles sont basés sur des semi-conducteurs inorganiques élémentaires et composés. Finalement, des semi-conducteurs organiques ont été utilisés et des polymères semi-conducteurs ont été développés.

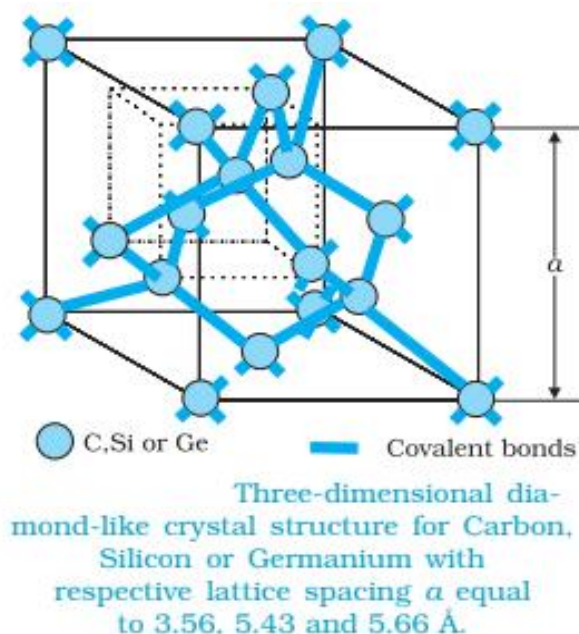
Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est la forme la plus pure d'un semi-conducteur, élémentaire, sans aucune impureté. Les éléments naturellement disponibles comme le silicium et le germanium sont les meilleurs exemples de semi-conducteur intrinsèque. Connaissons-les plus en détail.

Un trou n'est pas lui-même une grandeur physique mais un électron manquant dans la bande de valence. Un électron du site adjacent saute pour remplir ce trou et crée ainsi un trou à son ancien site. Il semble donc que le trou lui-même ait bougé.

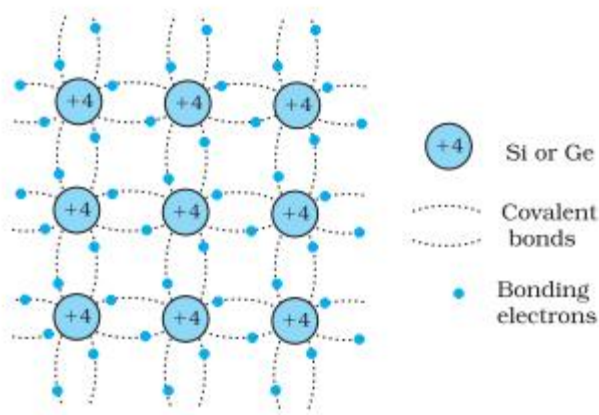
Lorsqu'une impureté est dopée en semi-conducteur, la conductivité du semi-conducteur
Le semi-conducteur pur a moins de porteurs de charge générés thermiquement. Mais lorsqu'il est dopé avec des atomes d'impuretés pentavalents ou trivalents, le nombre de porteurs de charge, c'est-à-dire les électrons et les trous, augmente. La conductivité augmente donc.

La structure en treillis des éléments



Ils sont également appelés structures de type diamant. Dans de telles structures, chaque atome est entouré de quatre atomes voisins. Maintenant, Si et Ge ont quatre électrons de valence et dans la structure cristalline, chaque atome partage l'un de ses électrons de valence avec chacun de ses quatre voisins.

En outre, il prend un électron de chacun de ses voisins. Cette paire d'électrons partagée est appelée liaison covalente ou liaison Valence. Voici à quoi ressemble la structure Si ou Ge en deux dimensions en mettant l'accent sur la liaison covalente:



Schematic two-dimensional representation of Si or Ge structure showing covalent bonds at low temperature (all bonds intact). +4 symbol indicates inner cores of Si or Ge.

En outre, l'image ci-dessus montre la structure avec toutes les liaisons intactes. Cela n'est possible qu'à basses températures. Au fur et à mesure que la température augmente et que plus d'énergie devient disponible pour les électrons de valence, ils se détachent conduisant à une augmentation de la conductivité de l'élément.

Maintenant, l'énergie thermique n'ionise que quelques atomes. Cette ionisation crée une vacance dans le lien. Lorsqu'un électron, ayant une charge $-q$, est excité à cause de l'énergie thermique, il se libère de la liaison. Cela laisse un poste vacant avec une charge effective $+q$. Cette vacance avec une charge électronique positive efficace est un trou.

Le trou se comporte également comme une particule libre mais avec une charge positive. Dans les semi-conducteurs intrinsèques, le nombre d'électrons libres est égal au nombre de trous et est appelé la concentration porteuse intrinsèque.

Semi-conducteurs extrinsèques

Les semi-conducteurs peuvent être largement classés en semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques. Les semi-conducteurs intrinsèques commencent à conduire à des températures supérieures à la température ambiante, le développement de dispositifs électroniques importants utilisant ces derniers peut poser un problème. Cela a conduit à un besoin d'améliorer la conductivité des semi-conducteurs intrinsèques.

Après quelques expériences, les scientifiques ont observé une augmentation de la conductivité d'un semi-conducteur lorsqu'une petite quantité d'impureté y a été ajoutée. Ces matériaux sont des semi-conducteurs extrinsèques ou des semi-conducteurs d'impuretés. Un autre terme pour ces matériaux est «semi-conducteur dopé». Les impuretés sont des dopants et le processus - le dopage.

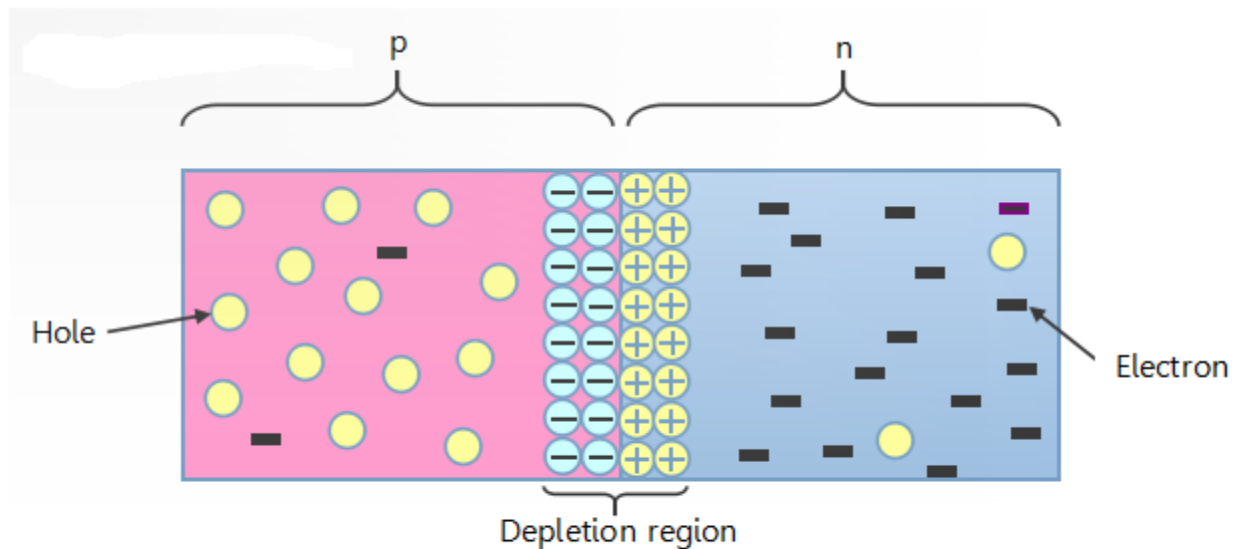
Dans un conducteur de type n, les atomes pentavalents sont dopants. La concentration d'électrons dans le conducteur de type n est plus élevée, les électrons sont donc les porteurs de charges majoritaires et les trous sont les porteurs de charges minoritaires.

Une condition importante au dopage est que la quantité d'impureté ajoutée ne modifie pas la structure du réseau du semi-conducteur. Pour y parvenir, la taille des atomes dopants et semi-conducteurs doit être la même.

JONCTION PN :

Comprendre la formation et le fonctionnement d'une jonction PN est primordial pour analyser le fonctionnement des dispositifs semi-conducteurs. Voyons comment se forme une jonction PN et comment elle se comporte sous une polarisation (ou une tension appliquée de l'extérieur).

Dans les matériaux de type p, les trous sont des porteurs majoritaires et les électrons sont des porteurs minoritaires dans les matériaux de type n. Lorsque les deux types de matériaux semi-conducteurs sont réunis, les électrons du matériau de type n diffusent dans un matériau de type p et se combinent avec des trous car leur concentration est plus élevée dans la couche de type n. Cela crée une couche d'ions négatifs près de la jonction dans un matériau de type p. Des ions négatifs se forment parce que les impuretés trivalentes (par exemple, l'aluminium) ont maintenant un électron supplémentaire provenant du matériau de type n. De même, les trous du matériau de type p diffusent dans le matériau de type n résultant en une couche d'ions positifs dans le matériau de type n. Ces ions négatifs créent un champ électrique dans la direction du type n au type p. Comme plus d'électrons diffusent dans un matériau de type p, la force du champ électrique continue d'augmenter. Les électrons d'un matériau de type n diffusant maintenant dans un matériau de type p devront surmonter le champ électrique dû aux ions négatifs. À un moment donné, le champ électrique devient suffisamment fort pour arrêter la diffusion des électrons.



Situation after the formation of depletion region

Formation d'une jonction pn

Imaginons une plaquette semi-conductrice mince en silicium de type p (p-Si). Maintenant, nous y ajoutons une impureté pentavalente. Pour cette raison, une petite partie de la tranche de p-Si est convertie en n-Si. Maintenant, la tranche contient une région p et une région n avec une jonction métallurgique entre les deux. Deux processus importants ont lieu lors de la formation d'une jonction pn:

1. La diffusion
2. Dérive

Dans un semi-conducteur de type n, la concentration d'électrons est supérieure à celle des trous. En revanche, dans un semi-conducteur de type p, la concentration des trous est supérieure à celle des électrons .

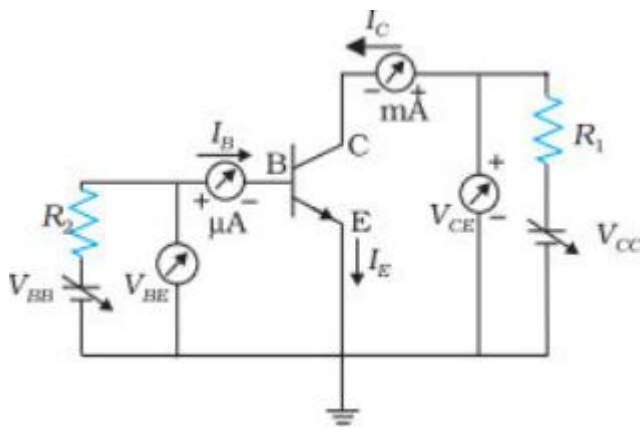
Lorsqu'une jonction pn se forme, les trous diffusent du côté p au côté n ($p \rightarrow n$) tandis que les électrons diffusent du côté n au côté p ($n \rightarrow p$). Cela se produit en raison du gradient de concentration à travers les côtés p et n. Cela donne lieu à un courant de diffusion à travers la jonction.

Caractéristiques d'un transistor de jonction EC

Dans la configuration Emetteur commun (EC), l'émetteur est le terminal commun. Par conséquent, l'entrée est entre la base et l'émetteur tandis que la sortie est entre le collecteur et l'émetteur. Deux termes dont vous devez vous souvenir:

- **Caractéristique d'entrée** - la variation du courant de base (I_B) avec la tension base-émetteur (V_{BE})
- **Caractéristique de sortie** - la variation du courant du collecteur (I_C) avec la tension collecteur-émetteur (V_{CE})

On observe que les caractéristiques de sortie sont contrôlées par les caractéristiques d'entrée. Par conséquent, le courant de collecteur change avec le courant de base. Étudions-les à l'aide d'un schéma de circuit ci-dessous:



Étudier les caractéristiques d'entrée

De plus, une courbe est tracée entre le courant de base (I_B) et la tension base-émetteur (V_{BE}) pour étudier les caractéristiques d'entrée du transistor de jonction en configuration CE. La tension collecteur-émetteur (V_{CE}) est maintenue à une valeur fixe pour étudier la relation entre I_B et V_{BE} .

Puisque nous avons l'intention d'étudier les caractéristiques d'entrée lorsque le transistor est dans un état actif, V_{CE} est maintenu à une grande valeur. La valeur choisie est suffisamment grande pour assurer la polarisation inverse de la jonction base-collecteur. Pour un transistor en silicium, $V_{CE} = 0,6-0,7$ V. Aussi,

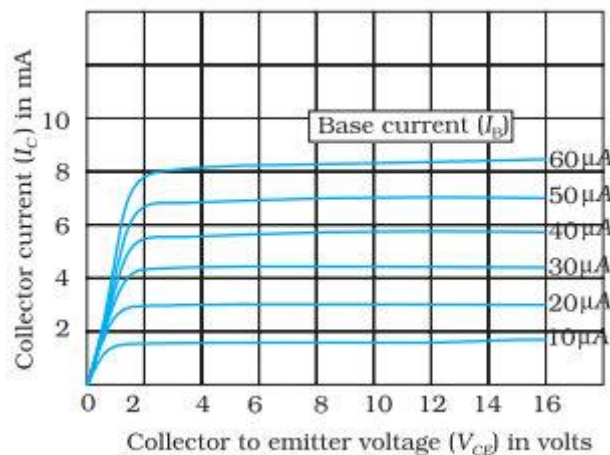
$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

Par conséquent, V_{CE} doit être maintenu à une valeur bien supérieure à 0,7 V. La plage de tension approximative se situe entre 3 et 20 V. Une augmentation de la valeur de V_{CE} apparaît comme une augmentation de la valeur de V_{CB} . Par conséquent, nous obtenons des courbes presque identiques pour différentes valeurs de V_{CE} .

Étudier les caractéristiques de sortie

Pour étudier les caractéristiques de sortie, nous allons tracer une courbe entre le courant du collecteur (I_C) et la tension collecteur-émetteur (V_{CE}). Maintenez également le courant de base (I_B) à une valeur constante.

Maintenant, si le courant de base-émetteur (V_{BE}) est légèrement augmenté, vous pouvez observer une augmentation du courant de trou de l'émetteur et du courant d'électrons des régions de base. Par conséquent, I_B et I_C augmentent proportionnellement. Ou, si I_B augmente, I_C augmente aussi. Ainsi, en maintenant I_B constant et en traçant I_C contre V_{CE} , vous pouvez faire les observations suivantes:



Pour chaque valeur de I_B , le tracé de I_C en fonction de V_{CE} affiche une caractéristique de sortie.

Calcul des paramètres AC importants des transistors de jonction

Maintenant, calculons certains paramètres importants des transistors en utilisant les segments linéaires des caractéristiques d'entrée et de sortie.

Résistance d'entrée (r_i)

La résistance d'entrée (r_i) est le rapport entre la variation de la tension base-émetteur (ΔV_{BE}) et la variation ultérieure du courant de base (ΔI_B) lorsque la tension collecteur-émetteur (V_{CE}) est maintenue constante.

$$r_i = (\Delta V_{BE} / \Delta I_B)_{V_{CE}}$$

Il s'agit d'une résistance alternative ou dynamique et qui est évidente dans les caractéristiques d'entrée car sa valeur varie avec le courant de fonctionnement dans le transistor.

Résistance de sortie (r_o)

La résistance de sortie (r_o) est le rapport entre la variation de la tension collecteur-émetteur (ΔV_{CE}) et la variation du courant de collecteur (ΔI_C) lorsque le courant de base (I_B) est maintenu constant.

$$r_o = (\Delta V_{CE} / \Delta I_C)_{I_B}$$

Un examen attentif des caractéristiques de sortie révèle qu'au départ, I_C augmente linéairement pour chaque petite variation de la valeur de V_{CE} . La raison est simple - la jonction base-collecteur n'est pas polarisée en inverse et le transistor n'est pas actif. Au contraire, le transistor est dans un état de saturation.

Par conséquent, le courant est contrôlé par la tension d'alimentation (V_{CC}) dans cette partie de la caractéristique. Dans cet état $V_{CC} = V_{CE}$. Lorsque V_{CE} augmente et atteint une valeur supérieure à celle requise pour inverser la polarisation de la jonction, I_C augmente légèrement avec l'augmentation de V_{CE} . Cette réciproque de la pente de la partie linéaire des caractéristiques de sortie offre la valeur de r_o .

La polarisation de la jonction base-collecteur contrôle principalement la résistance de sortie du transistor. De plus, la résistance de sortie (r_o) est très élevée. Cela est dû à l'état de polarisation inverse de la diode. Par conséquent, vous observez qu'au départ, la résistance est très faible lorsque le transistor est dans un état de saturation.

Facteur d'amplification actuel (β)

Le facteur d'amplification du courant (β) est le rapport entre la variation du courant du collecteur (I_C) et la variation du courant de base (I_B) lorsque la tension collecteur-émetteur (V_{CE}) est maintenue constante. De plus, le transistor est dans un état actif. Maintenant, le petit gain de courant du signal est

$$\beta_{ac} = (\Delta I_C / \Delta I_B)_{V_{CE}}$$

Cela a une grande valeur. En revanche, si l'on prend un simple rapport I_C et I_B , on obtient β_{dc} du transistor de jonction .

$$\beta_{dc} = I_C / I_B$$

Il est important de noter que I_C et I_B augmentent presque linéairement. En termes simples, si $I_B = 0$, alors $I_C = 0$. Par conséquent, les valeurs de β_{ac} et β_{dc} sont presque égales.

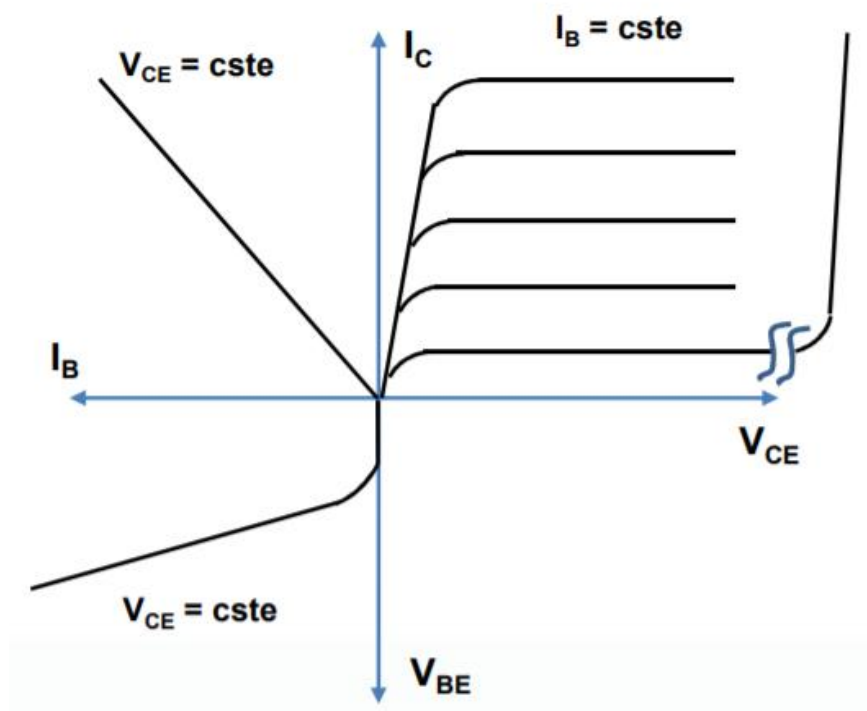
Réseau des caractéristiques statiques du transistor

Le transistor comporte trois accès, donc, il est caractérisé par 6 grandeurs électriques :

- 3 courants I_B , I_C et I_E
- 3 tensions V_{BE} , V_{CE} , V_{CB}

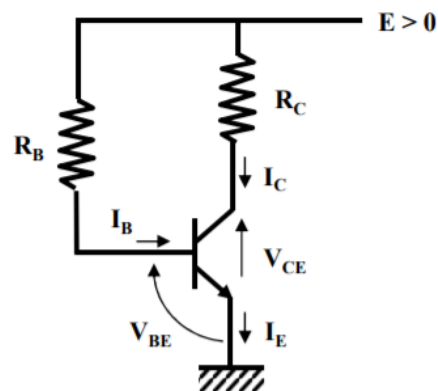
$$\text{Mais } I_E = I_C + I_B \text{ et } V_{CB} = V_{CE} + V_{EB}$$

C'est-à-dire, on doit avoir 4 relations indépendantes sont nécessaires pour le caractériser.



Polarisation du transistor - Droite de charge statique

Objectif de la polarisation : Fixer les valeurs des tensions V_{BE} , V_{CE} et des courants I_B , I_C pour imposer la localisation des points de fonctionnement dans le réseau



Exemple : polarisation directe de la base et du collecteur par deux résistances R_B et R_C

□ Droite de charge statique de sortie Δ :

$$I_C = \frac{E - V_{CE}}{R_C} \quad \rightarrow \text{tracé dans le réseau de caractéristique statique } I_C = f(V_{CE})$$

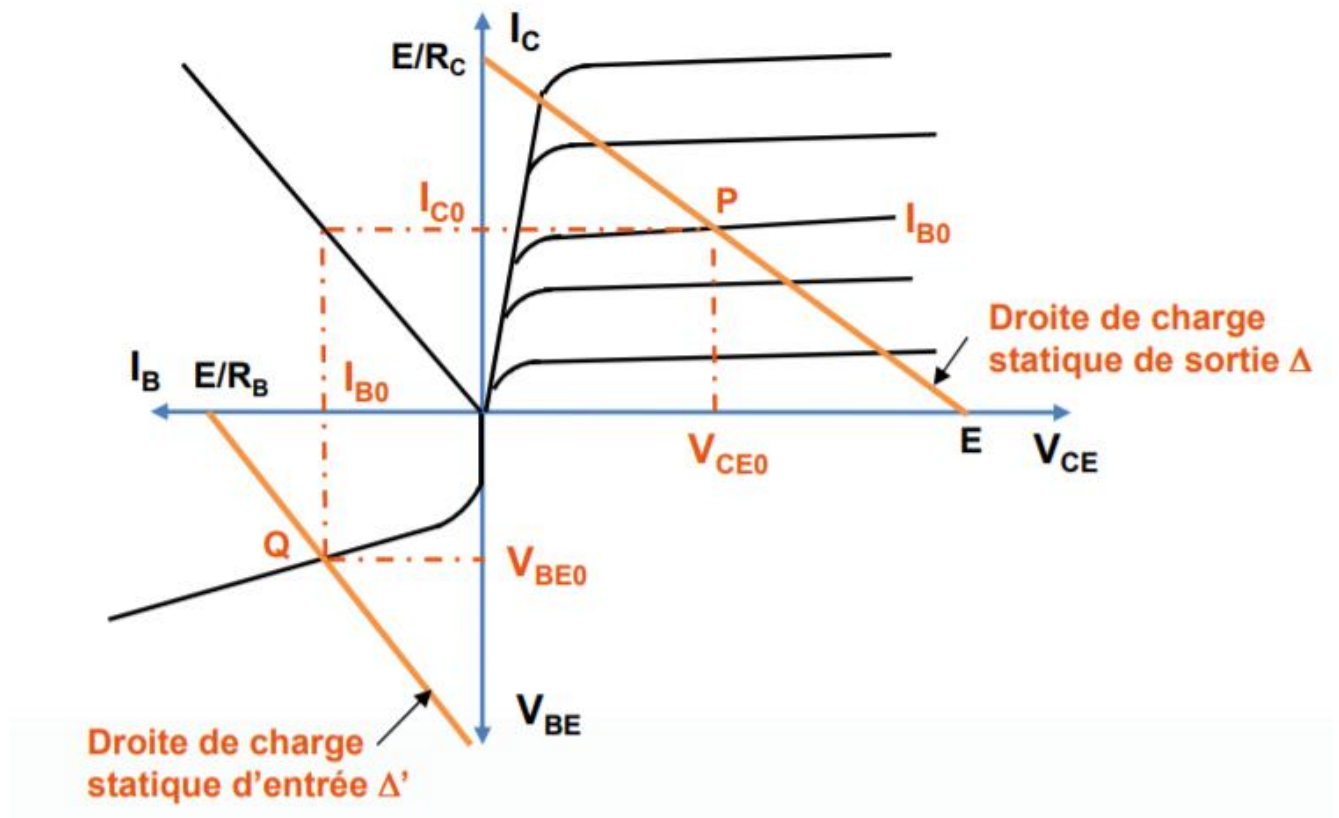
□ Droite de charge statique d'entrée Δ' :

$$I_B = \frac{E - V_{BE}}{R_B} \quad \rightarrow \text{tracé dans le réseau de caractéristique statique } I_B = f(V_{BE})$$

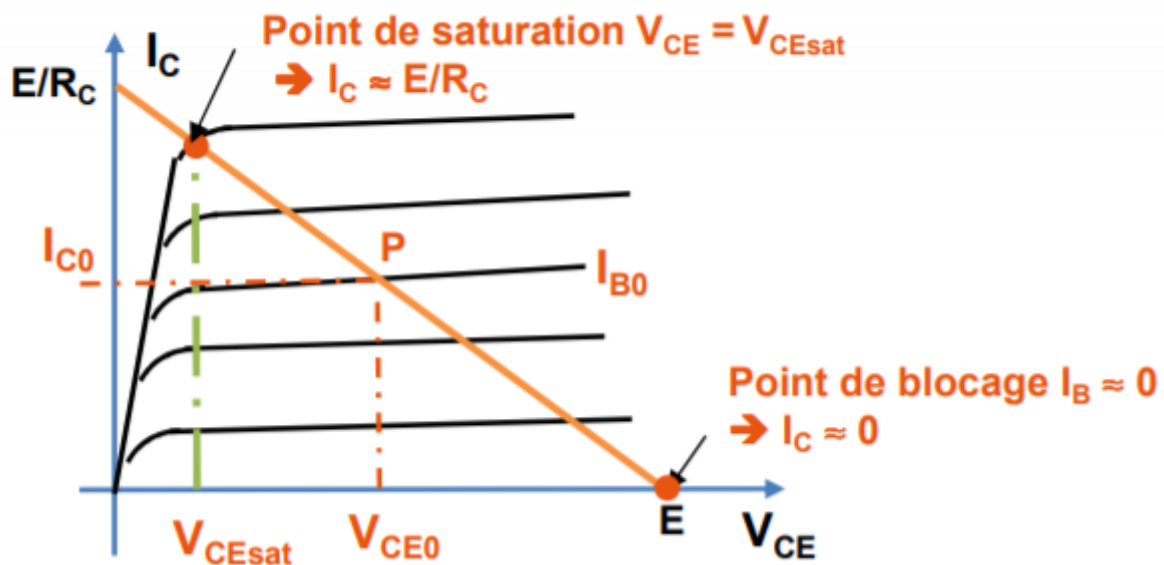
Polarisation du transistor – Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement Q dans le réseau d'entrée $I_B = g(V_{BE})$ est situé à l'intersection de la droite de charge Δ' et de la caractéristique.

Le point de fonctionnement P dans le réseau de sortie $I_C = f(V_{CE})$ est situé à l'intersection de la droite de charge Δ et d'une caractéristique $I_B = \text{cste}$.



Transistor bloqué – transistor saturé



La partie de la droite de charge statique située entre les points de blocage et de saturation définit la zone active :

$$I_{C\text{blocage}} \leq I_C \ll I_{C\text{saturation}}$$

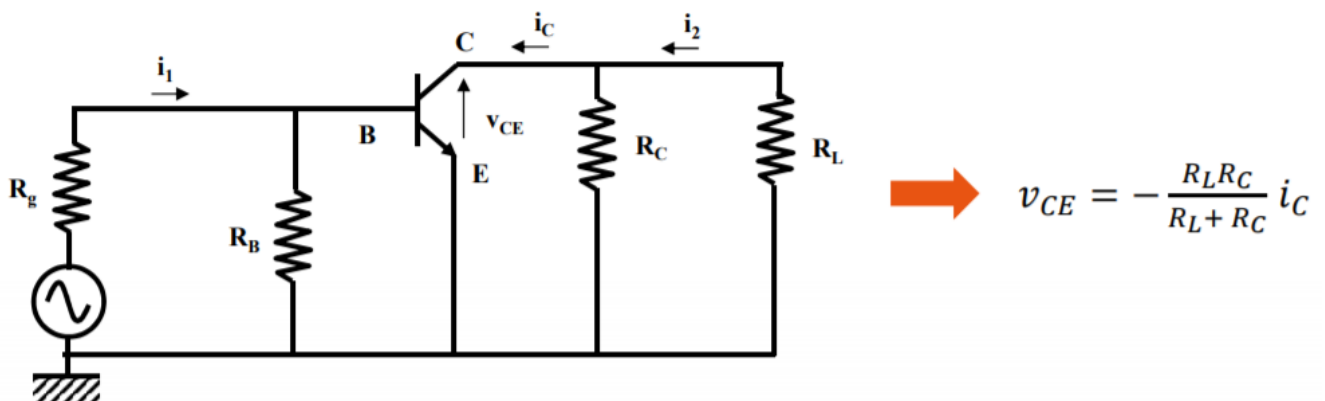
Au point de saturation, le transistor idéal est équivalent à un interrupteur fermé.

Au point de blocage, le transistor idéal est équivalent à un interrupteur ouvert

Analyse du circuit : application du théorème de superposition

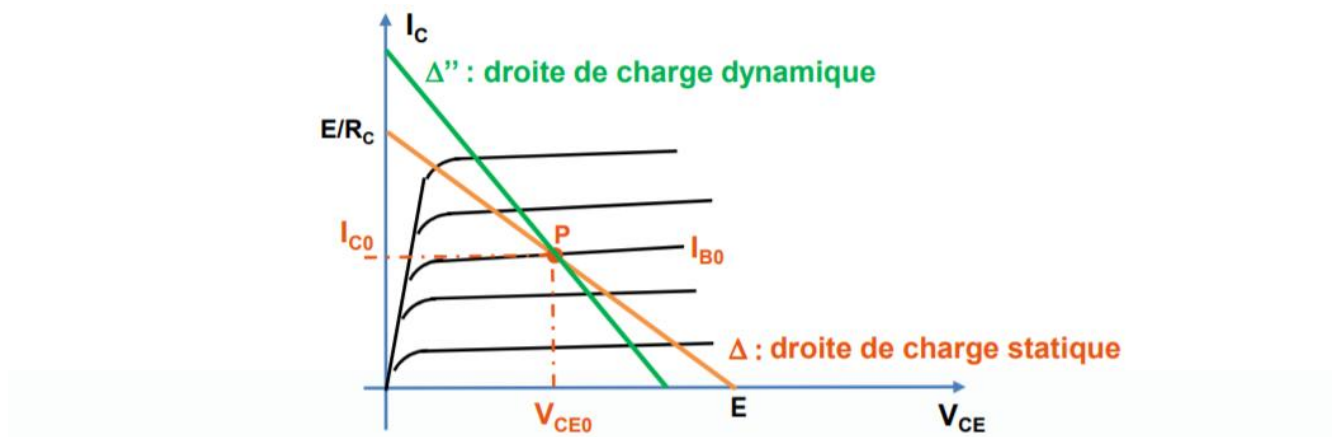
Etude dynamique (en régime sinusoïdal)

- ✚ La source continue est court-circuitée.
- ✚ Les capacités de découplage présentent une impédance nulle à la fréquence de fonctionnement.
- ✚ Schéma électrique en régime sinusoïdal

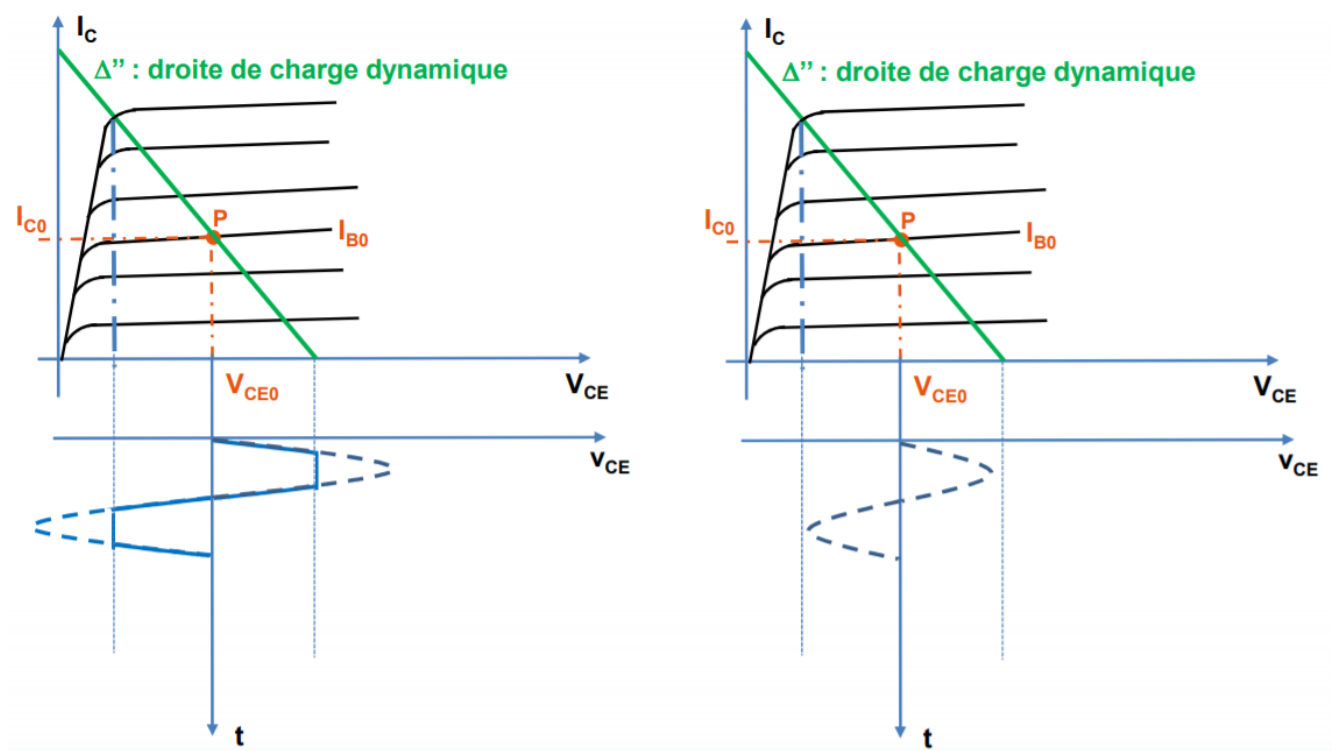


Analyse du circuit : tension composite de sortie

- ✚ La tension de sortie est donc un signal composite, somme de la composante continue v_{CE0} et de la composante alternative v_{CE} , soit : $V_{CE} = v_{CE} + v_{CE0}$
- ✚ La droite de charge dynamique Δ'' est la droite passant par le point de fonctionnement P dans le réseau (I_C, V_{CE}) et de pente $\frac{-1}{R_L // R_C} = - \frac{R_L + R_C}{R_L \times R_C}$



Zone de fonctionnement de l'amplificateur



Fonctionnement non linéaire, signal écrêté

Fonctionnement non linéaire